

多束涡旋光波串扰分布失真的相位补偿研究

陈少钦¹ 杨国伟¹ 李志鹏²

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要 使用空间分集技术可以提高自由空间光通信的抗大气湍流能力, 研究通过空间分集来提高探测涡旋光束拓扑荷数的可行性. 涡旋光波穿过大气湍流会形成轨道角动量模式间的串扰, 空间分集配置的多束涡旋光波也会引入倾斜相位而引起串扰分布的失真. 为了去除因光束倾斜导致的串扰分布失真, 对接收光波进行相位补偿, 以此来重建涡旋光束的涡旋相位. 采用光波传输计算机仿真, 模拟了大气湍流对串扰分布的影响和倾斜相位导致的串扰失真. 通过相位补偿去除倾斜相位影响, 发现多光束配置可以明显改善串扰分布失真, 提高检测涡旋光束拓扑荷数的准确性.

关键词 涡旋光束; 串扰分布; 空间分集; 相位补偿

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

0 引言

涡旋光束是一种带有轨道角动量(OAM)的光束, 不同拓扑荷数的 OAM 对应不同螺旋相位分布. 其中, 任意两种 OAM 模式之间都存在正交性, 因此可以在光通信中使用 OAM 复用技术来提高通信容量^[1-4], 满足诸多新兴高速传输互联的需求^[5,6]. 在自由空间光通信(FSO)系统中, 涡旋光束穿过湍流大气后, 其相位分布被不同程度地扰乱, 出现 OAM 模式间的串扰并导致接收机难以确定光束的拓扑荷数. 模式间的串扰分布其实可以作为分析涡旋光束拓扑荷数的重要信息, 但是其易受到大气湍流和其他系统配置的影响出现显著失真^[7,8]. 因此, 需要尽可能地恢复涡旋光束的涡旋相位和串扰分布来提高判断拓扑荷数^[9]的可靠性. 有报道基于波前传感器的自适应光学硬件和无传感器的自适应光学算法来补偿湍流引起的相位畸变, 但增加了系统成本和复杂度^[10,11]. 文献^[12]利用一束正交偏振的高斯光束作为检测光束来补偿涡旋光束的相位恶化, 并且有效降低大气湍流对光束的影响. 此外, 空间分集也是减弱大气湍流对涡旋光束影响的重要方法, 利用其空间分布分散特性, 可以有效降低闪烁指数^[13], 均衡信号的实时衰落强度^[14,15]. 然而, 使用空间分集会多束涡旋光波的串扰分布引入新的干扰因素, 本文中相位补偿的目的即是去除空间分集所引入的串扰失真.

针对上述问题, 本文首先研究了空间分集配置下涡旋光束的串扰分布以及倾斜相位对涡旋光束串扰分布的影响. 然后根据串扰分布的定义, 提出相位补偿方法来恢复涡旋光束的串扰分布. 最后通过基于大气随机相位屏的光波传输数值仿真方法模拟大气湍流中的涡旋光束, 验证了相位补偿恢复串扰分布的能力.

1 理论背景和概念

采用空间分集时, 为实现接收端各光束重合, 需要为每束涡旋光波叠加一个倾斜相位. 该倾斜相位显著影响涡旋光束在接收端的串扰分布, 降低了正确检测出拓扑荷数的可能性. 首先, 观察未倾斜时的涡旋光束相位, 在本文中以拉盖尔-高斯光束为例进行阐述, 其复振幅可以表示为^[16]

$$u(r, \phi, z) = E_0 \left(\sqrt{2} \frac{r}{w_z} \right)^l L_p^l \left(2 \frac{r^2}{w_z^2} \right) \frac{w_0}{w_z} \exp[-i\varphi_R(z)] \exp \left[i \frac{k}{2q(z)} \right] \exp[i\phi], \quad (1)$$

E_0 是光束幅度, r 是到中心点的距离, w_z 是传播距离 z 后的光束半径, w_0 是发射屏光束半径, l 是拓扑荷数,

收稿日期: 2018-11-26

基金项目: 国家青年科学基金项目(61405051, 61501157); 浙江省自然科学基金项目(LY17F050012); 浙江省公益技术应用研究计划项目(2017C31067)资助

通讯作者: 杨国伟, 男, 汉族, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向: 无线光通信, E-mail: guowei.yang@hdu.edu.cn.

$L_p^l\left(2\frac{r^2}{w_z^2}\right)$ 是拉盖尔多项式, φ_{pl} 是方位角, k 是波数, $q(z)$ 是光束参数. 单光束的倾斜相位可以表示为

$$P_l(\theta, y) = \exp(iktan(\theta)y), \quad (2)$$

其中 θ 是发射倾斜角度. 因此, 沿 y 轴正方向倾斜后的涡旋光束可表示为

$$u_l(r, \phi, z) = u(r, \phi, z) P_l(\theta, y). \quad (3)$$

如图 1(a) 所示, 拓扑荷数为 $l=1$ 的涡旋光束原始相位是一个理想的螺旋相位. 当涡旋光束倾斜时, 相当于给光束叠加了一个如图 1(b) 所示的倾斜相位, 使其相位分布变成如图 1(c) 所示的叉状相位.

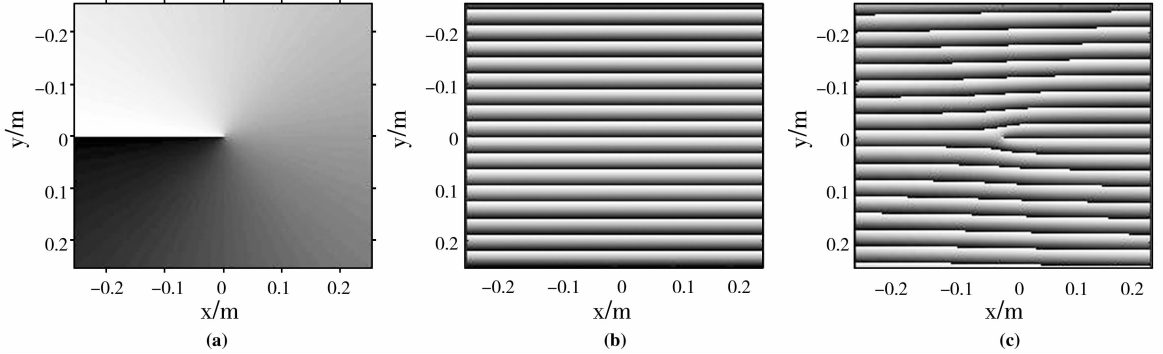


图 1 拓扑荷数 $l=1$ OAM 光束相位分布 (a) 单个直射 OAM 光波, (b) 倾斜波阵面, (c) 倾斜光束

文献[7]提出通过计算涡旋光束的内积得到串扰分布, 但该串扰分布与光强分布相关, 两束相同拓扑荷数但光束半径不同的涡旋光束计算得到的串扰分布会不相同, 并且根据这个定义计算得到的串扰分布在拓扑荷数为 0 处会出现奇点. 文献[17]中则认为串扰看作涡旋光束的螺旋谐波谱, $\exp[i\ell\phi]$ 为螺旋谐波函数即特征函数, 拓扑荷数为特征值, 这样可以避免文献[7]定义串扰分布的问题. 因此, 基于螺旋谐波谱将串扰值 C_{mm} 定义为

$$C_{mm} \triangleq \int r dr d\phi u_n(r, \phi, z) \exp(-im\phi) = \begin{cases} 0, & \forall n \neq m, \\ \int r dr d\phi |u_n(r, \phi, z)|, & n = m, \end{cases} \quad (4)$$

$u_n(r, \phi, z)$ 是拓扑荷数为 n 的涡旋光束, $\exp(-im\phi)$ 表示拓扑荷数为 m 的共轭涡旋相位. 该串扰定义借鉴信号傅里叶变换的概念, 认为涡旋光束是多个螺旋谐波函数的叠加态, 串扰的数值大小则是螺旋谐波函数的系数^[10]. 根据单束涡旋光波表达式(1), 可以推导出在接收屏上四束光波叠加后的相位分布公式

$$\begin{aligned} u_n^{a,b,c,d}(r, \phi, z) &= u_n^a(r, \phi, z) + u_n^b(r, \phi, z) + u_n^c(r, \phi, z) + u_n^d(r, \phi, z) \\ &= A(r, l, z) R(r, \phi, z) P_n(r, f, z) \{ \exp[-iktan(\theta)(y-d_0)] + \exp[iktan(\theta)(y+d_0)] \} \\ &\quad + \exp[-iktan(\theta)(x-d_0)] + \exp[iktan(\theta)(x+d_0)], \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $R(r, \phi, z) = \exp[-i\varphi_{pl}(z)] \exp\left[i\frac{k}{2q(z)}r^2\right] \exp[i\ell\phi]$, $A(r, l, z) = E_0 \left(\sqrt{2}\frac{r}{w_z}\right)^l L_p^l\left(2\frac{r^2}{w_z^2}\right) \frac{\omega_0}{w_z}$, 此外 $d_0 = \tan(\theta)D$, D 为链路长度, $P_n(r, f, z) = \exp\left[ik\left(\sqrt{\left(\frac{f+z}{f}\right)r^2 + (f+z)^2} - (f+z)\right)\right]$ 是环形相位, z 为传输距离, f 是瑞利长度, $x = r\cos(\phi)$ 以及 $y = r\sin(\phi)$. 为了理解更方便, 本文中的空间分集配置将光束分别沿 x 轴和 y 轴倾斜. 提取公共部分并化简, 然后利用欧拉公式

$$\begin{aligned} u_n^{a,b,c,d}(r, \phi, z) &= A(r, l, z) R(r, \phi, z) P_n(r, f, z) \times \{ \exp[iktan(\theta)y] + \exp[iktan(\theta)x] \\ &\quad + \exp[-iktan(\theta)y] + \exp[-iktan(\theta)x] \} \\ &= A(r, l, z) R(r, \phi, z) P_n(r, f, z) \times \{ \cos(ktan(\theta)y) + i\sin(ktan(\theta)y) + \cos(ktan(\theta)x) \\ &\quad - i\sin(ktan(\theta)x) + \cos(ktan(\theta)y) - i\sin(ktan(\theta)y) + \cos(ktan(\theta)x) \\ &\quad + i\sin(ktan(\theta)x) - i\sin(ktan(\theta)x) \} \exp(iktan(\theta)d_0) \\ &= A(r, l, z) R(r, \phi, z) P_n(r, f, z) \{ 2\cos(ktan(\theta)y) + 2\cos(ktan(\theta)x) \} \exp(iktan(\theta)d_0), \end{aligned} \quad (6)$$

将 $x = r\cos(\phi)$ 以及 $y = r\sin(\phi)$ 代入并利用 $\cos(a) + \cos(b) = 2\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$ 得到

$$\begin{aligned} u_n^{a,b,c,d}(r, \phi, z) &= A(r, l, z) R(r, \phi, z) P_n(r, f, z) \times 4 \left\{ \cos\left(ktan(\theta)\frac{r(\sin(\phi) + \cos(\phi))}{2}\right) \right. \\ &\quad \left. \times \cos\left(ktan(\theta)\frac{r(\sin(\phi) - \cos(\phi))}{2}\right) \right\} \exp(iktan(\theta)d_0), \end{aligned} \quad (7)$$

因此理论上得到的空间分集配置的四束涡旋光波叠加后的相位分布为

$$P_s(r, \phi, z) = \left\{ \cos\left(k \tan(\theta) \frac{r(\sin(\phi) + \cos(\phi))}{2}\right) \cos\left(k \tan(\theta) \frac{r(\sin(\theta) - \cos(\phi))}{2}\right) \right\} \exp(iktan(\theta)d_0). \quad (8)$$

在仿真实验中, $P_s(r, \phi, z)$ 的共轭相位将被用于倾斜相位的补偿. 也就是说, 使用 $P_s(r, \phi, z)$ 的共轭相位与接收端四束涡旋光波的叠加光场相乘进行相位补偿, 还原涡旋波束的涡旋相位, 从而在计算串扰分布的过程中可以获得倾斜相位补偿后的串扰分布, 提高对涡旋波束拓扑荷数的分辨能力.

2 仿真设置与结果分析

本文采用了基于大气随机相位屏的光波仿真程序对相位补偿效果进行研究, 光波仿真程序由 Matlab 编写完成, 设置工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 发射孔径 $D_T = 4 \text{ cm}$, 传输距离为 $L = 1 \text{ km}$, 大气湍流折射率结构常数 $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 接收孔径 $D_R = 11 \text{ cm}$, 注意, 本文主要目的是验证倾斜相位补偿的可行性, 因此只选取了中等强度湍流条件进行举例说明, 以下给出的结果均是 10000 次仿真结果的平均值.

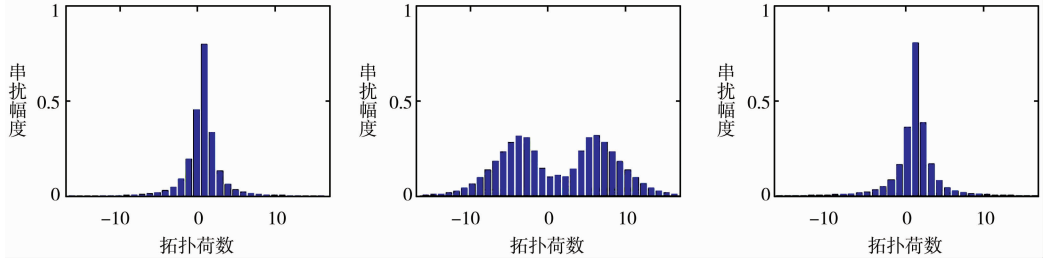


图 2 单束涡旋光波穿过大气湍流后的串扰分布(a)垂直出射, (b)倾斜出射且未经过相位补偿, (c)倾斜出射且经过相位补偿

首先, 对单束垂直(于发射面)和倾斜出射涡旋光束在穿过上述大气湍流后的串扰进行仿真计算. 由于倾斜相位与拓扑荷数无关, 因此这里仅考虑拓扑荷数 $l=1$ 的涡旋光束, 其串扰分布如图 2 所示, 注意本文考虑的拓扑荷数范围为 $[-16, 16]$. 图 2(a) 给出了垂直出射的涡旋光束的串扰分布, 此分布在 $l=1$ 处出现串扰峰值 $V_1 = 0.78$, 两侧快速递减, 可以直接判断出此光束的拓扑荷数 $l=1$. 图 2(b) 给出了未经相位补偿倾斜出射的串扰分布, 串扰值 $V_1 = 0.11$, 两侧均出现高于此值的串扰幅值, 因此无法准确判别出拓扑荷数. 然而, 经过相位补偿后的单束倾斜涡旋光束串扰值 $V_1 = 0.80$, 其串扰分布也与垂直出射涡旋光束的串扰分布基本一致, 如图 2(c) 所示. 由此可见, 光束倾斜出射所引起的串扰失真可以被相位补偿有效还原.

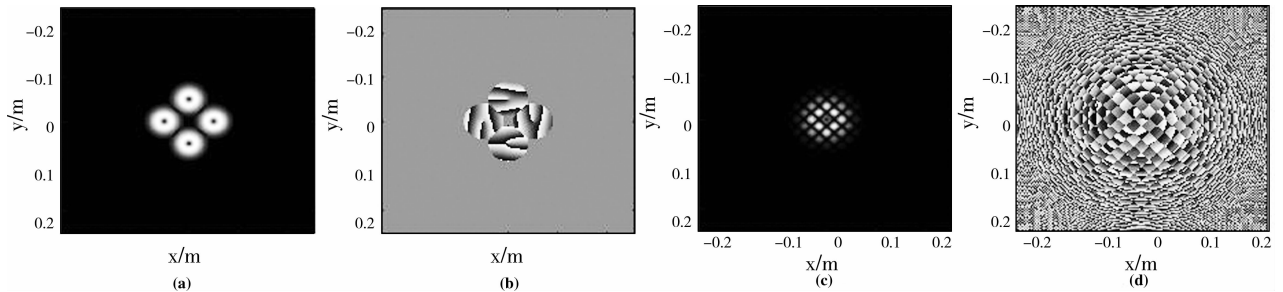


图 3 拓扑荷数 $l=1$ 的四束涡旋光波(a)发射光强分布, (b)发射相位分布(带发射孔径限制), (c)接收光强分布, (d)接收相位分布

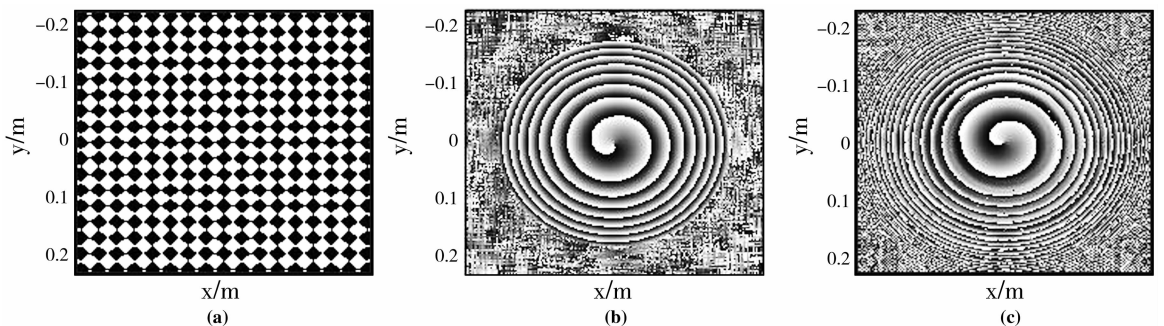


图 4 在接收平面上相位分布(a)公式(8)对应的四束涡旋光波的倾斜相位, (b)单束光波在真空中传输后的相位, (c)四束倾斜涡旋光波经过相位补偿的相位

随后, 对多光束倾斜出射进行了模拟仿真, 图 3 给出了空间分集配置的四束涡旋光波在发射屏和经过真空传输后接收屏上的光强分布与相位分布. 四束光波的中心分别在距离发射屏中心 0.05 m 的 $\pm x, \pm y$ 轴

上,如图 3(a)所示.接收屏上的光强和相位分布受到干涉与倾斜相位的共同影响,与垂直出射的涡旋光束光强与相位分布相差甚远,串扰值分布产生严重失真.根据上文公式(8)给出四束倾斜出射涡旋光束的补偿相位(如图 4(a)所示),对接收的光波进行相位补偿,得到还原后的相位分布,如图 4(c)所示.对比 4(b)与 4(c),可以发现相位补偿后与单束光束传输后的相位分布是基本一致的.对四束倾斜出射涡旋光波经过大气湍流后的串扰进行仿真计算,结果如图 5 所示.对比相位补偿前后的串扰分布,可以发现经过相位补偿后的串扰分布失真被有效还原.比较图 2(a)和图 5(b),串扰值均在 $l=1$ 处出现明显的峰值($V_1=0.78$),但空间分集配置的串扰能量被更加均衡地分布在其他 l 模式上,可以提高拓扑荷数实时判断的正确性,有助于 OAM 复用技术的实施.此外,有倾斜相位引起的串扰分布失真与湍流强度无关,因此在考虑更强湍流条件时,仅需采取更多的空间分集数来抑制串扰幅度.

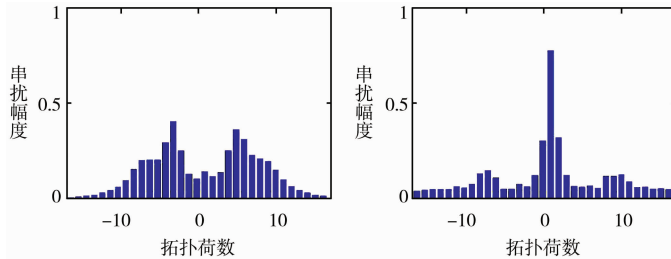


图 5 接收屏上,四束倾斜涡旋光束的均值串扰分布(a)未经过相位补偿($l=1$), (b)经过相位补偿($l=1$)

最后对采用不同拓扑荷数涡旋光束的空间分集系统进行了大气传输仿真,并计算了相位补偿前后的串扰分布,如图 6 所示.对比图 6 中三种情况得到的串扰分布,同轴传输四束不同拓扑荷数的涡旋光束和未经过相位补偿的四束倾斜光束的拓扑荷数已经无法判别.其中同轴传输情况下,可以较为明显的看出 $l=-4, +4$ 两处的峰值 $V_{\mp 4}=0.36$,分辨这两个位置的拓扑荷数是比较容易的,而在 $l=-12, +12$ 处的串扰值 $V_{\mp 12}=0.10$ 已小于附近值 $V_{\mp 10}=0.12$,故无法区分.而图 6(c)中,经过相位补偿后计算得到的串扰分布不仅在 $l=-4, +4$ 处有明显峰值 $V_{\mp 4}=0.26$,在 $l=-12, +12$ 处出现 $V_{\mp 12}=0.20$ 高于两侧峰值,并且串扰的四个峰值大小也更为接近.可见,相位补偿方法不仅可以去除由于光束倾斜导致的串扰失真,还可以与空间分集结合后起到均衡复用信道能量的作用.

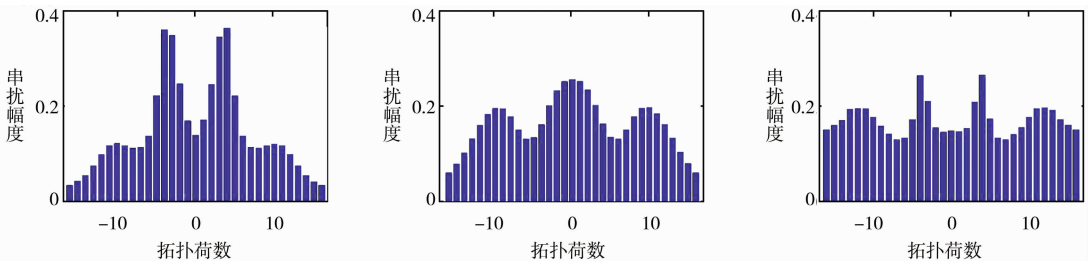


图 6 在接收屏计算得到的串扰分布($l=-12, -4, +4, +12$)(a)同轴传输的涡旋光束, (b)空间分集配置的涡旋光束且未经过相位补偿, (c)空间分集配置的涡旋光束且经过相位补偿

3 结论

本文采用计算机数值仿真的方法,研究了涡旋光束应用空间分集技术后的串扰恶化特性,并使用相位补偿的方法以去除光束倾斜造成的串扰影响.根据仿真结果可知,单光束倾斜时利用相位补偿方法可以有效去除由光束倾斜导致的串扰恶化,并且对使用空间分集配置后的光束串扰分布也有非常明显去除串扰恶化的效果.这一结果,对实际空间光通信系统中接收屏检测涡旋光束拓扑荷数是非常有帮助的.此外,空间分集配置的多 OAM 信道传输与相位补偿结合后可以实现信道能量均衡的目的.因此,相位补偿对于空间分集技术在自由空间光通信系统中的应用是至关重要的.

参 考 文 献

- [2] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [3] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [4] 张霞, 宿晓飞, 张磊, 等. 折射率环状分布光纤中基于高阶贝塞尔函数的轨道角动量模式分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 119-124.
- [5] 俞嘉生, 毕美华, 卓先好, 等. 基于非均匀量化 ADC/DAC 的 IMDD-UMFC 系统性能提升[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(4): 7-12.
- [6] 付妍, 忻海云, 胡卫生. 高速短距离光互联系统中基于概率整形的 SOA 非线性损伤抑制[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(4): 1-6.
- [7] Anguita J A, Neifeld M A, Vasic B V. Turbulence-induced channel crosstalk in an orbital angular momentum-multiplexed free-space optical link[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2414-2429.
- [8] 柯熙政, 宁川, 王姣. 大气湍流下轨道角动量复用态串扰分析[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 402-408.
- [9] Li S, Chen S, Gao C, et al. Atmospheric turbulence compensation in orbital angular momentum communications: advances and perspectives[J]. *Optics Communications*, 2018, 408: 68-81.
- [10] Li N, Chu X, Zhang P, et al. Compensation for the orbital angular momentum of a vortex beam in turbulent atmosphere by adaptive optics[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98: 7-11.
- [11] Chang H, Yin X, Cui X, et al. Adaptive optics compensation of orbital angular momentum beams with a modified Gerchberg-Saxton-based phase retrieval algorithm[J]. *Optics Communications*, 2017, 405: 271-275.
- [12] Ren Y, Xie G, Huang H, et al. Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2845-2848.
- [13] 李志鹏, 杨国伟, 毕美华, 等. 涡旋光束在大气湍流中的传输仿真[C]. // 空间光信息与组网技术及应用学术研讨会, 2015.
- [14] Yang G, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Fading correlation and analytical performance evaluation of the space-diversity free-space optical communications system[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(3): 1-10.
- [15] 刘洋, 章国安. 弱湍流信道无线光通信分集接收合并技术[J]. *激光技术*, 2014, 38(5): 698-702.
- [16] Cheng W, Haus J W, Zhan Q. *Korotkova Proceedings of SPIE 7200-Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves III*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2009.
- [17] Torner L, Torres J, Carrasco S. Digital spiral imaging[J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 873-881.

Phase Compensation for Crosstalk Distribution Distortion of Multiple Vortex Beams

CHEN Shao-qin¹ YANG Guo-wei¹ LI Zhi-peng²

(1. School of Telecommunication, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Ocean School, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract The use of spatial diversity technique can improve the anti-turbulence capability of free-space optical communication, we also consider the spatial diversity in this paper to improve the feasibility of detecting the topological charges of the vortex beams. Vortex beams propagating through the atmospheric turbulence will lead to the crosstalk between different orbital angular momentum states, meanwhile the spatial diversity of the multiple vortex beams will introduce tilted phase that causes the distortion of crosstalk distribution. In order to mitigate the crosstalk distribution distortion due to tilted beams, the post phase compensation for the received optical field can be implemented to reconstruct the vortex phase of the vortex beam. The crosstalk distribution and the crosstalk distortion caused by the atmosphere turbulence and the tilted phase, respectively, are simulated by the computer simulation of optical wave propagation. The simulation results show that the multi-beam configuration can significantly weakened the crosstalk distribution distortion and improve the accuracy of the topological charge detection by eliminating the tilted phase effect based on post phase compensation.

Key words vortex beam; crosstalk distribution; spatial diversity; phase compensation